

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
11. März 2004 (11.03.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2004/021528 A2

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: H01S 3/06

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2003/002899

(22) Internationales Anmeldedatum:
29. August 2003 (29.08.2003)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
102 40 599.9 30. August 2002 (30.08.2002) DE

(71) Anmelder (*für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US*): JENOPTIK LASER, OPTIK, SYSTEME GMBH [DE/DE]; Göschwitzer Strasse 25, 07745 Jena (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (*nur für US*): HOLLEMANN, Günther [DE/DE]; Wieselweg 15, 07749 Jena (DE). KRAUSE, Ulf [DE/DE]; Ilmritz, Im Klieber 2, 07751 Drackendorf (DE). BRAUN, Bernd [DE/DE]; Löbstedter strasse 9, 07749 Jena (DE).

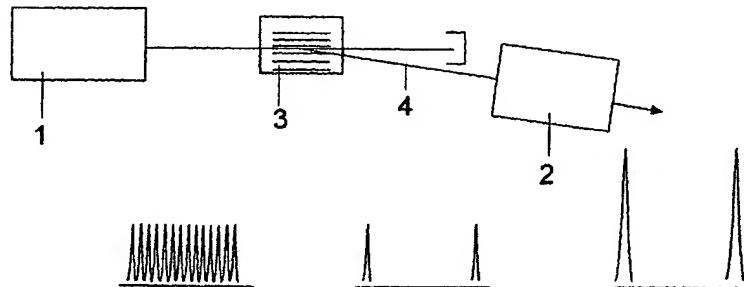
(74) Anwälte: BERTRAM, Helmut usw.; Oehmke & Kollegen, Neugasse 13, 07743 Jena (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (*national*): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: ARRANGEMENT AND METHOD FOR GENERATING ULTRASHORT LASER PULSES

(54) Bezeichnung: ANORDNUNG UND VERFAHREN ZUR ERZEUGUNG ULTRAKURZER LASERIMPULSE



(57) **Abstract:** The invention relates to an arrangement and a method for generating ultrashort laser pulses. The aim of the invention is to avoid the deterioration of the beam quality caused by the plurality of required revolutions, the accompanying loss of revolutions, and pulse broadening in regenerative amplifiers by means of a simpler and more cost-effective laser installation, and to provide ultrashort laser pulses with pulse repeat rates in an extended kHz range. In an installation consisting of a solid-state laser oscillator, a multi-stage laser amplifier which is arranged downstream therefrom and is used to increase the energy of pulses, and at least one switching element for selecting pulses from a pulse train provided by the solid-state laser oscillator, a small-signal gain higher than 10 is provided in an amplifying laser crystal in each amplification stage, the total small-signal gain produced by all amplifying laser crystals amounting to more than 100. In this way, ultrashort laser pulses having pulse lengths which are especially below 20 ps, pulse repeat rates between 1000 Hz and 10 MHz and pulse energies in the mJ range are generated, said ultrashort laser pulses being applicable in the fields of micromaterial machining and medicine.

(57) **Zusammenfassung:** Bei einer Anordnung und einem Verfahren zur Erzeugung ultrakurzer Laserimpulse besteht die Aufgabe, die in regenerativen Verstärkern durch die Vielzahl der benötigten Umläufe hervorgerufene Verschlechterung der Strahlqualität, damit einhergehende Umlaufverluste und Pulsverbreiterungen durch einen einfacheren und kostengünstigeren Laseraufbau zu vermeiden und ultrakurze Laserimpulse mit Pulswiederholraten in einem erweiterten kHz-Bereich zur Verfügung zu stellen. Bei einem Aufbau, bestehend aus einem Festkörperlaser-Oszillator, einem nachgeordneten mehrstufigen Laserverstärker zur Erhöhung der Pulsennergie von Impulsen und mindestens einem Schaltelement zur Auswahl von Impulsen aus einer von dem Festkörperlaser-Oszillator bereitgestellten Impulsfolge ist bei jeder Verstärkerstufe in einem verstärkenden Laserkristall eine Kleinsignalverstärkung von mehr als 10 vorgesehen, wobei die durch alle verstärkenden Laserkristalle hervorgerufene Gesamtkleinsignalverstärkung mehr als 100 beträgt. Dadurch können ultrakurze Laserimpulse mit Pulslängen insbesondere unterhalb von 20 ps, Pulswiederholraten im Bereich von 1000 Hz - 10 MHz und Pulsenenergien im mJ-Bereich erzeugt werden, die bevorzugt im Bereich der Mikromaterialbearbeitung und in medizinischen Bereichen Anwendung finden können.

WO 2004/021528 A2



SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) **Bestimmungsstaaten (regional):** ARIPO-Patent (GH,
GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW),
eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ,
TM), europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE,
DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL,
PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG,
CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu ver-
öffentlichen nach Erhalt des Berichts*

*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Ab-
kürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Co-
des and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der
PCT-Gazette verwiesen.*

Anordnung und Verfahren zur Erzeugung ultrakurzer Laserimpulse

Die Erfindung betrifft die Erzeugung ultrakurzer Laserimpulse mit Pulslängen unterhalb von 100 ps, Pulswiederholraten im Bereich von 1000 Hz - 10 MHz und Pulsennergien im mJ-Bereich.

Für derartige Ultrakurzpulsłaser, die insbesondere auf der Festkörperlasertechnologie beruhen und diodengepumpt sind, gibt es einen dringenden Bedarf in der Mikromaterialbearbeitung (z.B. Bohren von Düsen und Laser-Honen tribologischer Oberflächen). Ultrakurzpulsłaser können ebenso vorteilhaft eingesetzt werden für medizinische Anwendungen im Bereich der Ophthalmologie (z.B. refraktive Hornhautchirurgie) und der Zahnmedizin (z.B. Bearbeitung von Zahnhartmaterial).

Der Vorteil der Ultrakurzpulstechnik gegenüber akustooptisch gütegeschalteten Festkörperlasern mit längerer Pulsdauer von beispielsweise 10 ns und darüber, liegt darin, dass ein quasi „kalter“ Abtrag des Materials ohne Beeinträchtigung der lokalen Umgebung durch Schmelzauswürfe und thermische Aufheizung ermöglicht wird. So haben Untersuchungen (F. Dausinger, „Femtosecond technology for precision manufacturing: Fundamental and technical aspecs“, Proceedings of the International Congress on Laser Advanced Materials Processing (LAMP), 27.-31.05.02, Osaka, Japan (2002)) gezeigt, dass Pulsdauern von 5 ps - 10 ps beim Bohren metallischer Werkstoffe zu einem optimalen Ergebnis führen.

Ausschlaggebend für einen „kalten“ Materialabtrag und ein damit verbundenes positives Bearbeitungsergebnis sind nach dieser Veröffentlichung beispielsweise folgende Parameter:
5 Pulslängen unterhalb von 10 ps, Pulswiederholraten von 10 kHz - 100 kHz und eine Pulsenegie von 0,1 mJ - 1 mJ. Vorteilhaft wirkt sich dabei aus, dass die üblicherweise bei der Materialbearbeitung von Metallen mit „echten“ fs-Impulsen entstehenden Nachteile, wie eine Strukturierung der Bohrlochwände, Feldstärkedurchschläge an Luft, eine 10 komplexe Plasmaerzeugung, etc. vermieden werden.

Aus W. Koechner, „Solid-State Laser Engineering“, Fifth Edition, Springer Series in Optical Sciences, Springer, Berlin, 1999 bekannte Anordnungen zur Erzeugung von 15 energiereichen ultrakurzen Laserimpulsen, bestehend aus einem modengekoppelten Ti:Saphir-Laser-Oszillatör und einem im Strahl nachgeordneten regenerativen Verstärker, selektieren aus einer Folge von kurzen Oszillatörimpulsen niedrigerer Energie und einer Pulswiederholrate von z. B. 20 typischen 100 MHz Laserimpulsen mit einer niedrigeren Pulswiederholrate und verstärken die ausgewählten Impulse mit dem regenerativen Verstärker.

Regenerative Verstärker bestehen beispielsweise aus einem 25 endgepumpten Laserkristall und einem Spiegelsystem, das als stabiler Resonator ausgelegt ist. Sie verwenden innerhalb des Resonators eine Pockelszelle als aktives Schaltelement, das mit geringen Verlusten die Laserimpulse aktiv ein- und auskoppelt und dadurch die Pulsumlaufzahl 30 innerhalb des Resonators bestimmt. Ein systematischer Nachteil von regenerativen Verstärkern ist die mit der Vielzahl der benötigten Umläufe (typisch 5 - 100) verbundene Verschlechterung der Strahlqualität und die damit einhergehenden Umlaufverluste. Häufig tritt auch

eine Pulsverbreiterung durch die große Anzahl von Umläufen („Gain narrowing“) auf. Darüber hinaus entstehen in regenerativen Verstärkern hohe Pulsennergien und Pulsspitzenleistungen, die sehr hohe Anforderungen an die 5 optische Qualität von Material, Oberflächenpolitur und Beschichtung der optischen Komponenten voraussetzen.

Ferner sind Pockelszellen aufgrund des Hochspannungsbetriebes prinzipiell problematisch, da 10 hierfür bei Pulswiederholraten von 1 kHz und höher eine aufwändige Elektronik erforderlich ist. Für Pulswiederholraten über 50 kHz zeichnet sich mit Pockelszellen bislang kein technisch akzeptabler Lösungsansatz ab. Weitere Nachteile betreffen die starke 15 elektromagnetische Abstrahlung durch die modulierte Hochspannung.

Neuerdings (D.Müller, S.Erhard, A.Giesen, „High power thin disk Yb:YAG regenerative amplifier“, OSA TOPS Vol. 50, 20 Advanced Solid-State Lasers, 2001 Optical Society of America) wurden auch regenerative Verstärker auf der Basis von Scheibenlasern untersucht aber trotz vieler technischer Verbesserungen im Einzelnen bleiben die Ultrakurzpuls-Laser anspruchsvoll hinsichtlich der 25 Qualität der optischen Komponenten und die regenerativen Verstärker können bei Verwendung von EOM nur bis 10 kHz betrieben werden. Femtosekundenlasersysteme sind deshalb trotz vielversprechender, umfangreicher 30 Applikationsergebnisse als nicht industrietauglich anzusehen.

Aufgabe der Erfindung ist es, die in regenerativen Verstärkern durch die Vielzahl der benötigten Umläufe hervorgerufene Verschlechterung der Strahlqualität und

damit einhergehende Umlaufverluste und Pulsverbreiterungen durch einen einfacheren und kostengünstigeren Laseraufbau zu vermeiden. Dabei sollen ultrakurze Laserimpulse mit Pulswiederholraten in einem erweiterten kHz-Bereich und 5 mit Pulsenergien im mJ-Bereich zur Verfügung gestellt werden.

Gemäß der Erfindung wird die Aufgabe durch eine Anordnung zur Erzeugung ultrakurzer Laserimpulse gelöst, enthaltend 10 einen Festkörperlaser-Oszillator zur Bereitstellung einer Impulsfolge und einen nachgeordneten mehrstufigen Laserverstärker zur Erhöhung der Pulsenergie von Impulsen, die durch mindestens ein Schaltelement aus der Impulsfolge mit einer verringerten Pulswiederholrate gegenüber der 15 Impulsfolge ausgewählt sind, wobei der Laserverstärker bezüglich des zu verstärkenden Impulses resonatorlos und frei von aktiven Schaltelementen ist und höchstens einen doppelten Durchgang des zu verstärkenden Impulses aufweist. Für die Erfindung ist wesentlich, dass bei jeder 20 Verstärkerstufe in einem verstärkenden Laserkristall eine Kleinsignalverstärkung von mehr als 10 vorgesehen ist, wobei die durch alle verstärkenden Laserkristalle 25 hervorgerufene Gesamtkleinsignalverstärkung mehr als 100 beträgt.

Dabei ist es vorteilhaft, wenn die Kleinsignalverstärkung ein Erreichen einer Pulsenergie von mehr als 10 μ J gewährleistet.

30 Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen sind in den Unteransprüchen enthalten.

Durch die sehr hohe Gesamtkleinsignalverstärkung von mehr als 100 kann mit sehr kleinen Leistungen geseedet werden,

was die Bildung ultrakurzer Impulse stark vereinfacht. So wird bei einer Kleinsignalverstärkung von beispielsweise 10^6 , einer ausreichenden Speicherfähigkeit des aktiven Verstärkermediums und einer Eingangspulsenergie von 10 nJ - 100 nJ bereits in einem einfachen Strahldurchtritt durch den Laserverstärker eine Anhebung der Pulsennergie in den für die Materialbearbeitung wesentlichen Bereich von 0,1 mJ - 5 mJ möglich.

10 Mit dem Verzicht auf einen regenerativen Verstärker und dessen Resonatoraufbau ist auch der Vorteil verbunden, das komplexe Schaltregime einer aktiven Impulsein- und -auskopplung nach mehrmaligem Umlauf nicht mehr verwenden zu müssen. Folglich kann auch der in dem regenerativen Verstärker zwingend vorhandene elektro-optische Modulator 15 ersetzt werden durch ein Schaltelement, der die genannten Nachteile nicht aufweist. An das ersetzende Schaltelement sind auch nicht mehr die hohen Anforderungen hinsichtlich geringer Transmissionssverluste zu stellen.

20 Vor allem ist das von Vorteil für einen vereinfachten Aufbau des zur Auswahl der Laserimpulse dienenden Schaltelementes. Dieses kann nunmehr als einzelner akustooptischer Modulator oder als Paar davon zwischen dem 25 Festkörperlaser-Oszillatator und dem Verstärkereingang des Laserverstärkers angeordnet werden.

Da das Schaltelement außerhalb des Laserverstärkers 30 angeordnet ist, enthält der Laserverstärker, für den bei der vorliegenden Erfindung kein Laserresonator vorgesehen ist, im Unterschied zu einem regenerativen Verstärker auch kein aktives Strahlschaltelement mehr. Der bevorzugt verwendete, einfach aufgebaute und damit kostengünstige

akusto-optische Modulator ist ausschließlich als „Pulspicker“ eingesetzt.

In vorteilhafter Ausgestaltung kann der akusto-optische Modulator von einer Photodiode getriggert sein, die in Verbindung mit einem elektronischen Zähler die Auswahl der Impulse bestimmt. Hierdurch ist die Pulswiederholrate durch eine Einstellung der in einer Zeiteinheit auszuwählenden Impulse quasi-kontinuierlich varierbar.

10

Die Erfindung schließt es selbstverständlich nicht aus, dass als Schaltelement ein elektro-optischer Modulator verwendet wird, der zwischen dem Festkörperlaser-Oszillator und dem Verstärkereingang des Laserverstärkers angeordnet ist. Im Unterschied zu einer Anordnung in einem regenerativen Verstärker ist ein solches Schaltelement jedoch nur einer geringen optischen Leistungsbelastung ausgesetzt.

20

Zur Vermeidung von Rückwirkungen aus dem Laserverstärker in den Festkörperlaser-Oszillator ist es von Vorteil, zwischen dem Festkörperlaser-Oszillator und dem Laserverstärker einen Faraday-Isolator anzuordnen oder das Schaltelement zusätzlich als optischen Isolator zwischen dem Festkörperlaser-Oszillator und dem Laserverstärker vorzusehen. Zur Vermeidung reflektierter Strahlung aus der Anwendung in den Laserverstärker kann auch zusätzlich oder einzeln im Strahlengang nach dem Laserverstärker ein Faraday-Isolator vorgesehen werden. Einer solchen Schutzmaßnahme dient auch die Nachordnung eines Polarisators und einer Lambda-viertel-Platte nach dem Laserverstärker.

Die bevorzugt für diodenlasergepumpte, modenengekoppelte Festkörperlaser-Oszillatoren vorgesehene Erfindung ist nicht auf solche beschränkt, sondern auch für gütegeschaltete, hochrepetierende gepulste Laser-
5 Oszillatoren, für passiv gütegeschaltete Laser-Oszillatoren sowie für Microchiplaser und gepulste Diodenlaser geeignet.

Bei einer sehr hohen Verstärkung ist es besonders von
10 Vorteil, einen Hilfsresonator für eine andere Wellenlänge als die des zu verstärkenden Impulses oder die orthogonal polarisierte Komponente des Impulses vorzusehen, der den Laserverstärker als laseraktives Element enthält und der bei steigender Inversion im verstärkenden Laserkristall
15 anschwingt und diese auf einen niedrigen Wert begrenzt.

Selbst durch diese Maßnahme bleibt der Laserverstärker quasi resonatorfrei, da er für die Wellenlänge und die Polarisation des zu verstärkenden Impulses nicht wirksam ist.

20 Die erfindungsgemäße Verstärkeranordnung kann auch sehr vorteilhaft zur Erzeugung von ultrakurzen Laserimpulsen im UV-Bereich verwendet werden, indem ein oder mehrere nichtlinear optische Kristalle zur
25 Wellenlängentransformation nachgeordnet werden.

Die obenstehende Aufgabe wird ferner erfindungsgemäß durch ein Verfahren zur Erzeugung ultrakurzer Laserimpulse durch Auswahl von Impulsen mit verringrigerter Pulswiederholrate
30 aus einer primären Impulsfolge und durch Verstärkung der ausgewählten Impulse mit einem bezüglich des zu verstärkenden Impulses resonatorlosen mehrstufigen Laserverstärker gelöst, aus dem eine Auskopplung der verstärkten Impulse frei von aktiven Schaltvorgängen

erfolgt, wobei die Verstärkung höchstens mit einem doppelten Durchgang durch in den Verstärkerstufen vorgesehene verstärkende Medien verbunden ist und wobei die ausgewählten Impulse in jeder Verstärkerstufe mit 5 einer Kleinsignalverstärkung von mehr als 10, mindestens jedoch mit einer Gesamtkleinsignalverstärkung von mehr als 100 verstärkt werden.

Mit der Erfindung wird eine industrietaugliche 10 Laserstrahlquelle mit einfacherem Aufbau bereitgestellt, die ultrakurze Laserimpulse im ps-Bereich und mit Pulsenergien im mJ-Bereich liefert und deren Pulswiederholraten im kHz-Bereich genügend Zeit zwischen zwei Impulsen für eine thermische Relaxierung von bearbeitetem Material lassen. 15 Indem dadurch ein Abfließen der Wärme in das Werkstück verhindert wird, kommt es zu keinen unerwünschten thermischen Schädigungen im Nachbarbereich der direkten Wechselwirkung.

20 Die Erfindung soll nachstehend anhand der schematischen Zeichnung näher erläutert werden. Es zeigen:

Fig. 1 den Gesamtaufbau einer Anordnung zur 25 Erzeugung ultrakurzer Laserimpulse mit schematischer Darstellung der jeweils vorliegenden Impulse

Fig. 2 den Aufbau eines modengekoppelten Festkörperlaser-Oszillators

30 Fig. 3 den Aufbau eines Laserverstärkers, der dem modengekoppelten Festkörperlaser-Oszillator nachgeschaltet ist

Fig. 4 eine Anordnung zur Erzeugung ultrakurzer Laserimpulse, mit zwei akusto-optischen Modulatoren als Schaltelemente

5 Fig. 5 den Aufbau eines Hilfsresonators

Fig. 6 eine Anordnung zur Erzeugung ultrakurzer Laserimpulse mit Schutzeinrichtungen vor zurücktretender Strahlung

10

Bei der in Fig. 1 dargestellten Anordnung ist zwischen einem modengekoppelten Festkörperlaser-Oszillatator 1 und dem Verstärkereingang eines Laserverstärkers 2 ein akusto-optischer Modulator 3 als bevorzugtes Schaltelement zur 15 Auswahl von Impulsen aus einer von dem Festkörperlaser-Oszillatator 1 bereitgestellten Impulsfolge angeordnet.

Der beim Einschalten des akusto-optischen Modulators in die erste Ordnung gebeugte Strahl 4 wird in den Laserverstärker 2 eingekoppelt. Dabei sind die mit 20 handelsüblichen Modulatoren erreichbaren Anstiegsflanken von beispielsweise 10 ns ausreichend, um einen Einzelimpuls aus einem Impulszug bei Pulswiederholraten bis 100 MHz (Pulsabstand 10 ns) auszuwählen. Wird noch mit einem weiteren akusto-optischen Modulator (Fi. 4) 25 gearbeitet, führt das zu einer Verringerung der Leistung innerhalb des Modulators, zu einer schärferen Fokussierung und zu noch kürzeren Schaltzeiten.

Der als „Pulspicker“ eingesetzte akusto-optische Modulator 3 kann von einer schnellen Photodiode getriggert werden, die den Impulszug detektiert und mittels einer schnellen Elektronik beispielsweise jeden 100sten oder jeden 1000sten Puls auszählt und synchronisiert das Zeitfenster für diesen Impuls öffnet. Hierdurch ist auch gleichzeitig

eine quasi-kontinuierliche Variation der Pulswiederholrate möglich, da die Anzahl der ausgewählten Impulse pro Zeiteinheit frei wählbar ist.

5 Außerdem ist der „Pulspicker“ dazu geeignet, die Funktion der optischen Isolation zu übernehmen, da er nach der Pulsauswahl wieder schließt.

10 Die Pulswiederholrate kann bei konstanter Durchschnittsleistung in Grenzen geändert werden. Beispielsweise verringert sich bei Nd:YVO₄ die Durchschnittsleistung nur um 5 %, wenn die Pulswiederholrate von 500 kHz auf 50 kHz verringert wird.

15 Der in Fig. 2 dargestellte Festkörperlaser-Oszillator 1 enthält einen Nd:YVO₄-Laserkristall 5, der mit Hilfe eines Dioidenlasers 6 mit dazugehöriger Pumpoptik 7 diodengepumpt ist. Der Festkörperlaser-Oszillator 1 ist durch Umlenkspiegel 8 mehrfach gefaltet und arbeitet mit einem 20 sättigbaren Halbleiterabsorber 9 und einem Endspiegel 10. Bei dem Aufbau gemäß Fig. 2 bestehen verschiedene Möglichkeiten der Strahlauskopplung. So kann zwischen dem Laserkristall 5 und der Pumpoptik 7 z. B. ein dichroitischer Spiegel angeordnet werden.

25 Mit dem im vorliegenden Ausführungsbeispiel verwendeten diodengepumpten Nd:YVO₄-Oszillator mit einer Pulswiederholrate von 30 MHz (Pulsabstand 33 ns), einer Ausgangsleistung von 5 W und einer Pulsdauer von 8 ps 30 resultiert eine Pulsenegie von 170 nJ.

Der akusto-optische Modulator 3, dessen Pulsanstiegszeit 10 ns beträgt, wählt jeden 500sten Impuls mit einer Beugungseffektivität von mehr als 80% aus, so dass eine

durchschnittliche Eingangsleistung am Verstärkereingang des Laserverstärkers 2 größer als 5 mW bei 60 kHz Pulswiederholrate beträgt.

5 Der in Fig. 3 dargestellte Laserverstärker, dessen einzelne Verstärkerstufen bereits in der DE 100 43 269 A1 ausführlich beschrieben wurden und auf die hier Bezug genommen wird, besteht aus sechs solcher Verstärkerstufen mit einer seriellen Anordnung von sechs Laserkristallen 12
10 - 17 als verstärkende Medien, die von ebenso vielen jeweils zugeordneten Hochleistungsdiodenlasern (in Fig. 3 verdeckt) diodengepumpt sind. Im Unterschied zu den für die Erzeugung von ultrakurzen Impulsen bisher verwendeten regenerativen Verstärkern weisen die Verstärkerstufen des
15 bei der Erfindung verwendeten Laserverstärkers keinen Resonatoraufbau auf. Die aus den Hochleistungsdiodenlasern austretende Pumpstrahlung wird zunächst kollimiert und anschließend in die Laserkristalle 12 - 17 fokussiert, die zur Erreichung eines hohen stimulierten Emissions-
20 wirkungsquerschnittes im vorliegenden Ausführungsbeispiel Nd:YVO₄-Kristalle sind. Aufgrund der hohen Strahlqualität der Pumpstrahlung in der Fast-Axis-Richtung entsteht ein stark elliptischer Pumpfokus mit Abmessungen von etwa 0,1 mm x 2,0 mm, woraus bei einer absorbierten Pumpleistung
25 von 18 W eine sehr hohe Pumpleistungsdichte und damit eine sehr hohe Kleinsignalverstärkung resultiert. Diese beträgt mehr als 10 pro Verstärkerstufe, so dass sich für die sechs vorgesehenen Verstärkerstufen eine Gesamtkleinsignal-Verstärkung von größer 10⁶ ergibt.
30 Außer Nd:YVO₄-Kristallen sind vorteilhaft auch Nd:Gd:YVO₄-Kristalle oder andere Nd-dotierte Kristalle verwendbar.

Ein aus dem Festkörperlaser-Oszillator 1 austretender runder Laserstrahl 18 durchläuft zur Vermeidung von Rückwirkungen aus dem Laserverstärker in den Festkörperlaser-Oszillator 1 einen Faraday-Isolator 19 mit 5 z. B. 30 - 60 dB Dämpfung und durchstrahlt modenangepasst durch eine Linsenkombination 20 in einem Zick-Zack-Pfad nacheinander alle sechs Laserkristalle 12 - 17. Zusätzlich wird der Laserstrahl 18 zur weiteren Anpassung an den stark elliptischen Pumpfokus mittels Zylinderlinsen 21, 22 10 in die Laserkristalle 12 - 17 fokussiert, so dass der in der Tangentialebene kollimierte Laserstrahl 18 die Laserkristalle 12 - 17 in der Sagittalebene mit einem stark elliptischen Fokus durchsetzt. Der vorliegende Laserverstärker ist zweigeteilt, wobei die beiden Teile 15 über ein Periskop 23 optisch verbunden sind.

Nach seinem zweiten Durchtritt durch die Zylinderlinsen 21, 22 ist der Laserstrahl 18 auch in der Sagittalebene wieder mit dem gleichen elliptischen Querschnitt 20 kollimiert wie vor dem ersten Durchtritt durch die Zylinderlinsen 21, 22.

Somit sind die Laserkristalle 12 - 17 von modenangepassten Strahlen der Pumpstrahlung und der zu verstärkenden 25 Laserstrahlung 18 durchsetzt, wobei sich infolge der eingestrahlten elliptischen Pumpstrahlung eine thermische Linse mit unterschiedlicher Stärke in zueinander senkrechten Ebenen ausbildet. Die Laserstrahlung 18 ist, in der Ebene mit starker thermischer Linse fokussiert, in 30 jeden der Laserkristalle 12 - 17 gerichtet, wobei eine sich bildende Strahltaille im Bereich der thermischen Linse liegt.

Zur Gewährleistung des Zick-Zack-Pfades dienen Faltspiegel
24 - 29, die auch dazu genutzt werden können, die
Strahlabmessungen in der Slow-Axis-Richtung anzupassen.
Weitere Umlenkelemente 30 - 34 dienen dem Aufbau einer
5 kompakten Anordnung.

Der Laserstrahl 18 wird nach seinem Austritt aus dem
Laserverstärker mittels einer nicht dargestellten
Linsenanordnung, bestehend aus z. B. Zylinderlinsen, den
10 gewünschten Strahlparametern für die vorgesehene Anwendung
angepasst.

Mit dem sechsstufigen Laserverstärker gemäß Fig. 3 lassen
sich bei einer Kleinsignalverstärkung von 1.000.000
15 Durchschnittsleistungen von 40 W - 60 W im gesättigten
Betrieb erzielen. Die Lebensdauer des angeregten
metastabilen Laserniveaus von Nd:YVO₄ beträgt 90 μ sec, was
einer Pulsenegie von über 1,3 mJ entspricht. Die
Pulslänge bleibt unverändert, da bei relativ langen
20 Impulsen von 8 ps Pulsdauer noch kein „Gain Narrowing“ im
Laserverstärker auftritt. Die Pulsspitzenleistung beträgt
somit 160 MW.

In Bezug auf die Angaben zur erforderlichen gesättigten
25 Verstärkung des Laserverstärkers ist anhand der
nachfolgenden Tabelle festzustellen, dass sich aufgrund
der Lebensdauer des oberen Laserniveaus und einer
verstärkten Spontanemission (ASE) die Verstärkung in
Sättigung in Abhängigkeit von der Pulswiederholrate
30 verringert, analog zu gütegeschalteten Lasern und
Laserverstärkern von gütegeschalteten Oszillatoren mit
Pulslängen im ns-Bereich.

Pulswiederholrate	Durchschnittsleistung nach dem Pulspicker	Erforderliche gesättigte Verstärkung für 40 W Durchschnittsleistung
1 kHz	0,17 mW	$2,4 \times 10^5$
10 kHz	1,7 mW	$2,4 \times 10^4$
100 kHz	17 mW	$2,4 \times 10^3$
1 MHz	170 mW	$2,4 \times 10^2$

Aus der nachfolgenden Tabelle sind die mit dem in Fig. 3 dargestellten Laserverstärker im Vergleich zu einer 5 Pumpanordnung mit fasergekoppeltem Diodenlaser (N. Hodgson, D. Dudley, L. Gruber, W. Jordan, H. Hoffmann, „Diode end-pumped, TEM_{00} Nd:YVO₄ laser with output power greater than 12 W at 355 nm“, CLEO 2001, Optical Society of America, Techn. Digest, 389, (2001)) erreichbaren 10 Pumpstrahlquerschnitte zu entnehmen. Die Pumpstrahlquerschnitte und damit die erreichbare Pumpleistungsdichte sind entscheidende Voraussetzung, um eine hohe Kleinsignalverstärkung zu erreichen (W. Koechner, „Solid-State Laser Engineering“, Fifth Edition, 15 Springer Series in Optical Sciences, Springer, Berlin, 1999).

Parameter	Fasergekoppelte Diode	Elliptischer Pumpquerschnitt
Strahldurchmesser x	0,6 mm	2,2 mm
Strahldurchmesser y	0,6 mm	0,05 mm
Gepumpte Fläche (Fokus)	$0,28 \text{ mm}^2$	$0,09 \text{ mm}^2$
Effektiver Querschnitt	$0,56 \text{ mm}^2$	$0,17 \text{ mm}^2$
Kleinsignalverstärkung	2	15

Als effektiver Querschnitt wird der wirksame gemittelte gewichtete Querschnitt entlang der Absorptionslänge im Laserkristall bezeichnet. Vereinfachend wurde ein Faktor 2 gegenüber der minimalen Querschnittsfläche angenommen.

5

Bei der in Fig. 4 dargestellten Anordnung einer weiteren Ausführung der Erfindung, die als Schaltelemente zwei akusto-optische Modulatoren 35, 36 verwendet, erzeugt der Festkörperlaser-Oszillator 1 einen Impulszug mit einer Pulswiederholrate von beispielsweise 200 MHz. Der erste akusto-optische Modulator 35 zerschneidet den Impulszug in Pulspakete mit einer Pulspaketwiederholrate von beispielsweise 200 kHz, wobei jedes Pulspaket 10 Impulse enthält. Dadurch wird die optische mittlere Leistung für den zweiten akusto-optischen Modulator 36 auf 1% verringert, so dass sehr klein fokussiert werden kann und dadurch schnelle Schaltflanken zum Ausschneiden eines Einzelimpulses ermöglicht werden.

20 In einer weiteren Ausführung gemäß Fig. 5 ist ein Hilfsresonator vorgesehen, der allerdings nicht wirksam ist für die zur weiteren Verwendung vorgesehene Wellenlänge λ_1 des Oszillatorstrahls. Der Hilfsresonator enthält zwei, dem Laserverstärker 2 benachbarte 25 dichroitische Strahlteiler 37, 38, die für die Wellenlänge λ_1 transmittierend sind und für eine mit dem Laserverstärker 2 ebenfalls verstärkbare zweite Wellenlänge λ_2 (oder für eine andere Polarisation) hochreflektierend wirken.

30 Von zwei den Hilfsresonator bildenden Resonatorspiegeln 39, 40 ist beispielsweise der eine Resonatorspiegel 39 hochreflektierend für die Wellenlänge λ_2 und der andere Resonatorspiegel 40 dient als Auskoppler für die Wellenlänge λ_2 .

Der Hilfsresonator, dessen Laserschwelle durch die Wahl des Auskoppelgrades des Resonatorspiegels 40 eingestellt ist, schwingt an, wenn die Verstärkung im verstärkenden Medium des Laserverstärkers 2 einen kritischen Wert erreicht und begrenzt somit die maximale Kleinsignalverstärkung. Dadurch kann ein durch verstärkte Spontanemission (ASE) entstehender störender Dauerstrich-Untergrund zur gepulsten Strahlung wirksam verhindert werden, z. B. wenn der Festkörperlaser-Oszillatator 1 eine zu geringe Pulswiederholrate aufweist oder ausgeschaltet wird.

Gleichzeitig wird dadurch nach dem Einschalten des Festkörperlaser-Oszillatator 1 im Laserverstärker 2 schneller ein thermisch stationärer Zustand erreicht.

Die aus dem Hilfsresonator austretende Laserstrahlung der Wellenlänge λ_2 ist in der Regel nicht direkt nutzbar und kann beispielsweise in einer Strahlfalle 41 aufgefangen werden.

Der Hilfsresonator kann auch zur Unterdrückung der störenden Überhöhung des Erstimpulses verwendet werden, die ihre Ursache ebenso in der gegenüber dem stationären Betrieb angehobenen Inversion im laseraktiven Medium hat.

Zum Schutz der verstärkenden Elemente in dem Laserverstärker 2 und des Festkörperlaser-Oszillators 1 vor zurücktretender Strahlung aus einer Applikation können Schutzeinrichtungen gemäß Fig. 6 vorgesehen sein. Eine geeignete Maßnahme ist z. B. eine hinter dem Verstärkerausgang platzierte Lambda-viertel-Platte 42 mit einem Polarisator 43. Es kann zu diesem Zweck auch möglich sein, dem Festkörperlaser-Oszillators 1, wie schon in Fig. 3 enthalten, einen Faraday-Isolator 44 nachzuordnen, der

auch einen Schutz vor zurücktretender Strahlung aus dem Laserverstärker 2 bietet.

Patentansprüche

1. Anordnung zur Erzeugung ultrakurzer Laserimpulse mit einem Festkörperlaser-Oszillator zur Bereitstellung einer Impulsfolge und einem nachgeordneten mehrstufigen

5 Laserverstärker zur Erhöhung der Pulsenegie von Impulsen, die durch mindestens ein Schaltelement aus der Impulsfolge mit einer verringerten Pulswiederholrate gegenüber der Impulsfolge ausgewählt sind, wobei der Laserverstärker bezüglich des zu verstärkenden Impulses resonatorlos und frei von aktiven Schaltelementen ist und höchstens einen doppelten Durchgang des zu verstärkenden Impulses aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass

10 bei jeder Verstärkerstufe in einem verstärkenden Laserkristall (12 - 17) eine Kleinsignalverstärkung von mehr als 10 vorgesehen ist, wobei die durch alle verstärkenden Laserkristalle hervorgerufene

15 Gesamtkleinsignalverstärkung mehr als 100 beträgt.

20

2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass

der Laserverstärker (2) als laseraktives Element in einem Resonator angeordnet ist, der für eine zweite andere Wellenlänge (λ_2) als eine zur weiteren Verwendung vorgesehene erste Wellenlänge (λ_1) des zu verstärkenden Impulses oder für eine zweite Polarisationskomponente wirksam ist, die orthogonal zu der zur weiteren Verwendung vorgesehenen ersten Polarisationskomponente gerichtet ist.

25

3. Anordnung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass

dem Laserverstärker (2) zwei dichroitische Strahlteiler (37, 38) benachbarte sind, die für die erste Wellenlänge (λ_1) oder für die erste Polarisationskomponente des zu verstärkenden Impulses transmittierend und für die zweite Wellenlänge (λ_2) oder

30

35

die zweite Polarisationskomponente hochreflektierend ausgebildet sind, wobei die zweite Wellenlänge (λ_2) oder die zweite Polarisationskomponente durch die Strahlteiler (37, 38) auf Resonatorspiegel (39, 40) gerichtet sind, von denen einer hochreflektierend für die zweite Wellenlänge (λ_2) oder die zweite Polarisationskomponente ist und der andere zur Auskopplung der zweiten Wellenlänge (λ_2) oder der zweiten Polarisationskomponente dient.

10

4. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass das Schaltelement ein akusto-optischer Modulator (3) ist, der zwischen dem Festkörperlaser-Oszillatator (1) und dem Verstärkereingang des Laserverstärkers (2) angeordnet ist.

15

5. Anordnung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass der akusto-optische Modulator (3) von einer Photodiode getriggert ist, die in Verbindung mit einem elektronischen Zähler die Auswahl der Impulse bestimmt.

20

6. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass zwei akusto-optische Modulatoren (35, 36) als Schaltelemente hintereinander zwischen dem Festkörperlaser-Oszillatator (1) und dem Verstärkereingang des Laserverstärkers (2) angeordnet sind.

25

30

7. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Pulswiederholrate durch eine Einstellung der in einer Zeiteinheit auszuwählenden Impulse variierbar ist.

35

8. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass das Schaltelement ein elektro-optischer Modulator ist, der zwischen dem

Festkörperlaser-Oszillator (1) und dem Verstärkereingang des Laserverstärkers (2) angeordnet ist.

- 5 9. Anordnung nach einem der Ansprüche 4 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass das Schaltelement zusätzlich als optischer Isolator zwischen dem Festkörper-Laser-Oszillator (1) und dem Laserverstärker (2) zur Vermeidung von Rückwirkungen aus dem Laserverstärker (2) in den Festkörperlaser-Oszillator (1) vorgesehen ist.
- 10 10. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen dem Festkörper-Laser-Oszillator (1) und dem Laserverstärker (2) ein Faraday-Isolator (19, 44) zur Vermeidung von Rückwirkungen aus dem Laserverstärker (2) in den Festkörperlaser-Oszillator (1) angeordnet ist.
- 15 20 11. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass der Festkörperlaser-Oszillator (1) diodengepumpt und modengekoppelt ist.
- 25 12. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass der Festkörperlaser-Oszillator (1) als gütegeschalteter, hochrepetierender gepulster Oszillator ausgebildet ist.
- 30 13. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass der Festkörperlaser-Oszillator (1) als passiv gütegeschalteter Oszillator ausgebildet ist.
- 35 14. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass der Festkörperlaser-Oszillator (1) als Microchiplaser ausgebildet ist.

15. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass der Festkörperlaser-Oszillator (1) als gepulster Diodenlaser ausgebildet ist.
- 5 16. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass dem Laserverstärker (2) zur Vermeidung von Rückwirkungen aus einer Applikation in den Festkörperlaser-Oszillator (1) ein Polarisator (43) und eine Lambda-viertel-Platte (42) oder ein Faraday-
10 Isolator nachgeordnet sind.
17. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass dem Laserverstärker (2) zur Erzeugung von ultrakurzen Laserimpulsen im UV-Bereich
15 mindestens ein nichtlinear optischer Kristall zur Wellenlängentransformation nachgeordnet wird.
18. Verfahren zur Erzeugung ultrakurzer Laserimpulse durch Auswahl von Impulsen mit verringriger Pulswiederholrate aus einer primären Impulsfolge und durch Verstärkung der ausgewählten Impulse mit einem bezüglich des zu verstärkenden Impulses resonatorlosen mehrstufigen Laserverstärker, aus dem eine Auskopplung der verstärkten Impulse frei von aktiven Schaltvorgängen erfolgt, wobei die Verstärkung höchstens mit einem doppelten Durchgang durch in den Verstärkerstufen vorgesehene verstärkende Medien verbunden ist und wobei die ausgewählten Impulse in jeder Verstärkerstufe mit einer Kleinsignalverstärkung von mehr als 10,
20 mindestens jedoch mit einer Gesamtkleinsignalverstärkung von mehr als 100 verstärkt werden.
- 25
- 30

1/3

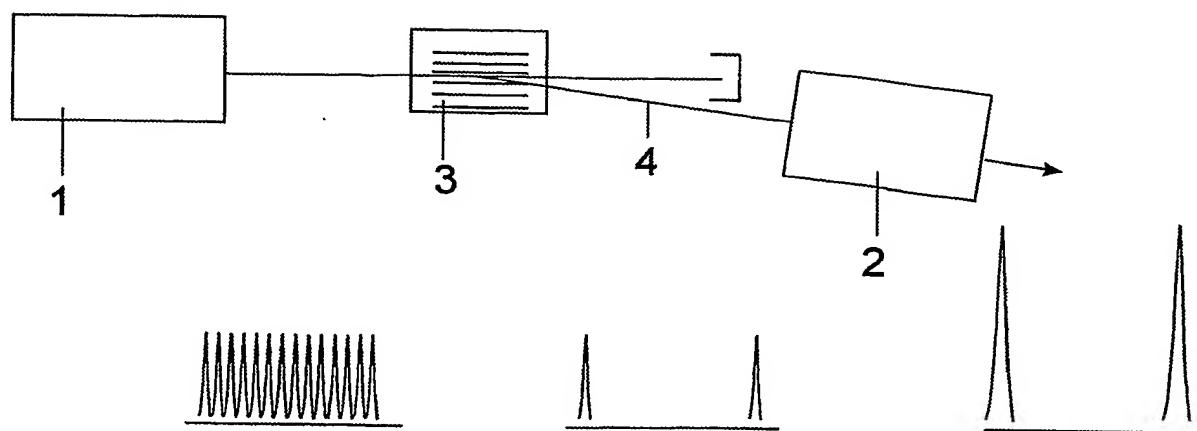


Fig. 1

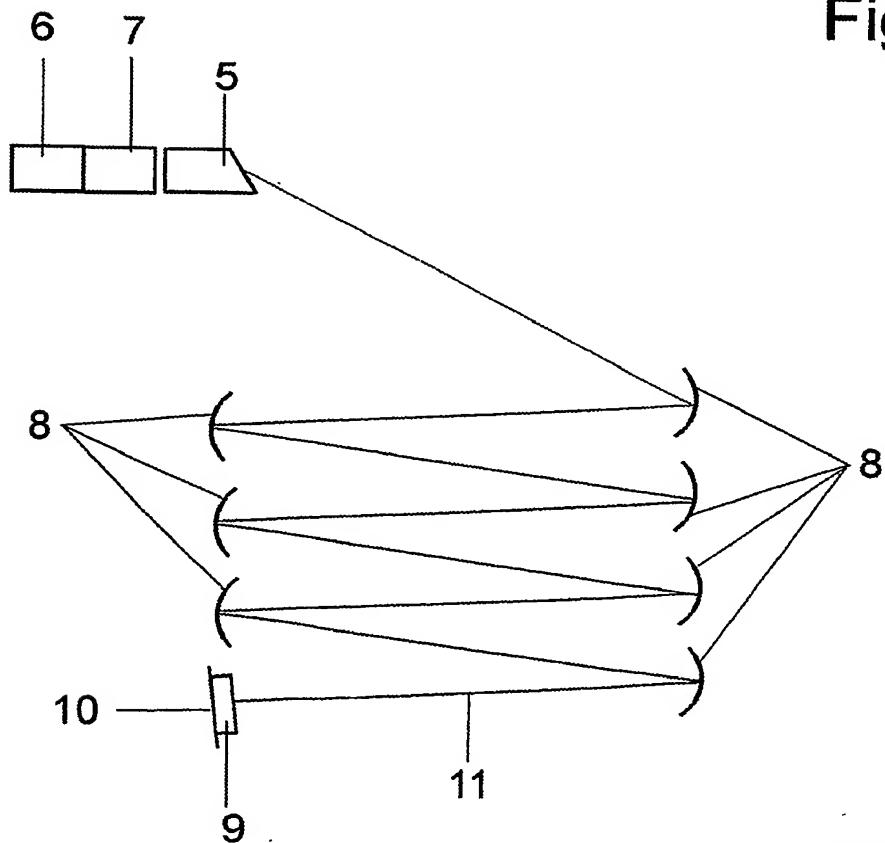


Fig. 2

2/3

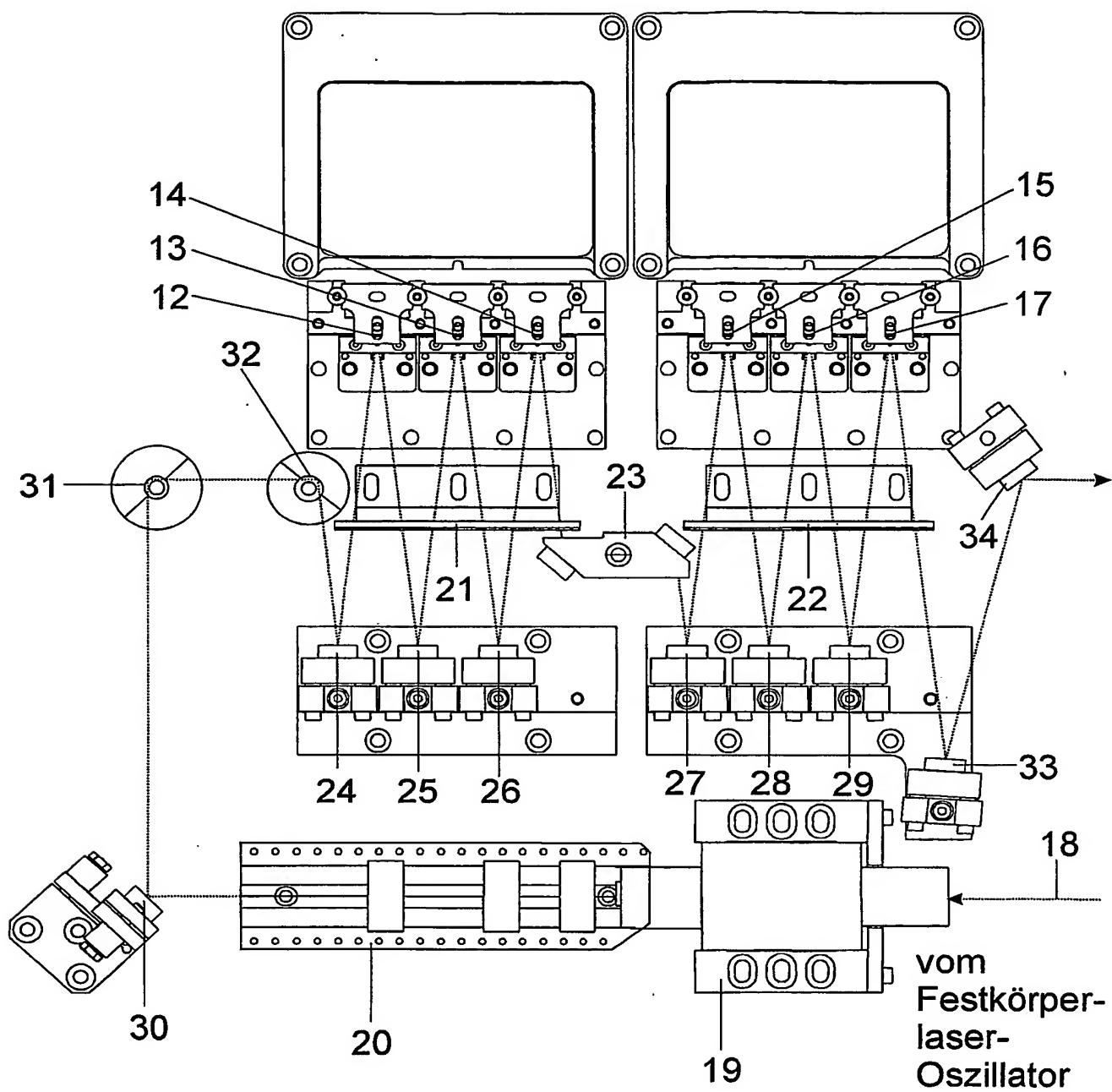


Fig. 3

3/3

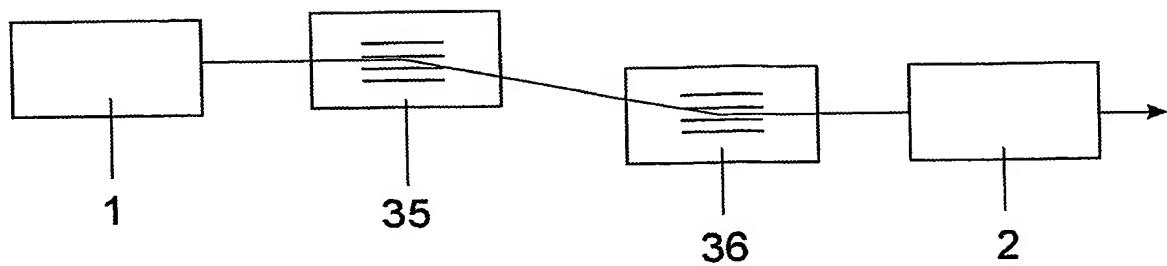


Fig. 4

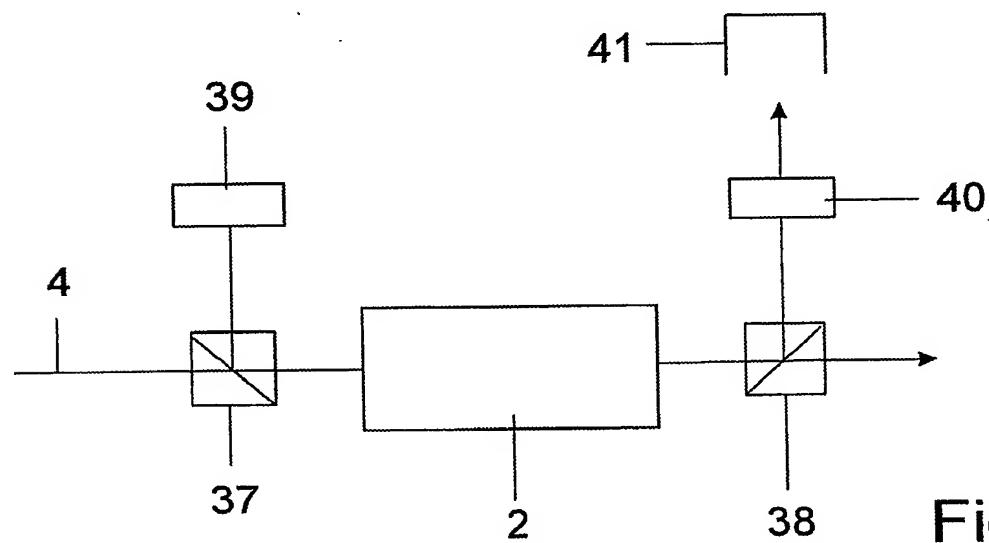


Fig. 5

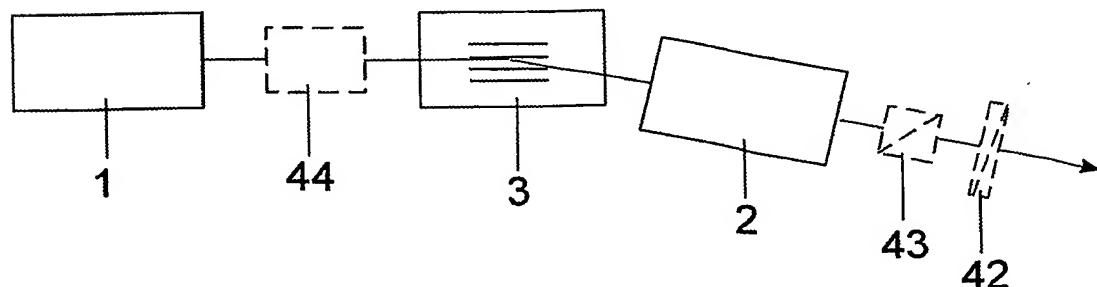


Fig. 6